

ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СТАЛИ И НЛЗ НА КАЧЕСТВО ПРОКАТА ИЗ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Аннотация. В статье рассмотрены особенности сквозной технологии производства высокоуглеродистой стали, ее внепечной обработки, непрерывной разливки, прокатки бунтового проката и катанки, формирующие качественные показатели металла, эффективно перерабатываемого на метизном переделе. В процессе исследований изучены влияние технологических факторов на комплекс качественных показателей стали, НЛЗ, а затем и бунтового проката. При этом приведены технологические приемы, обеспечивающие узкий диапазон значений легирующих элементов, а также низкий уровень вредных примесей в высокоуглеродистой стали. Разработаны мероприятия по снижению загрязнения металла неметаллическими включениями (НВ). Показано, что на снижение загрязненности стали НВ влияет комплекс технико-технологических мероприятий, таких как модифицирование стали в СК кальцийсодержащей порошковой проволокой (ПП) или редкоземельной лигатурой (это достаточно дорогой метод), наведение «белых» шлаков для десульфурации и глубокого раскисления стали, обработка стали вакуумом (вакуумно-углеродное раскисление), защита струи металла при непрерывной разливке от вторичного окисления, применение основных огнеупоров для футеровки СК и проковша (ПК), выбор материала для разливочных стаканов-дозаторов и т.п. Немаловажное влияние на свойства бунтового проката оказывают ликвационные процессы в НЛЗ. Это в первую очередь относится к микрофизической дендритной ликвации, которая в прокате выявляется в виде структурной продольной полосчатости с наличием микроучастков с отклонением химического состава от ковшевого анализа и возникновением в ряде случаев закалочных структур. В комплексе это обеспечило высокую технологичность переработки катанки и бунтового проката в проволочные изделия.

Ключевые слова: высокоуглеродистая сталь, сквозная технология, химический состав, неметаллические включения, структура, технологичность переработки

Введение

Развитие оборудования и технологии производства стали, непрерывнолитых заготовок (НЛЗ) и бунтового проката широкого маркопрофильного сортамента и назначения (от рядовых сталей до легированных и высоколегированных марок стали) за последние полстолетия обусловило повышение качества заготовок, полупродукта и готовых металлоизделий в технологической цепи ДСП-ковшевая (внепечная обработка стали в СК) – вакуумирование металла в установках разной конструкции (циркуляционный, порционный, камерный, струйный и т.п.) – непрерывная разливка – подготовка НЛЗ к прокатке (при необходимости) – нагрев заготовок в ПШП (ПШБ) – прокатка – термомеханическая обработка в потоке станов с использованием тепла прокатного нагрева, как ресурсосберегающей и эффективной технологии. При этом обеспечивается качество, в ряде случаев не уступающее переплавленным технологиям (ЭШП и т.п. переделам).

Основные показатели качества стали, НЛЗ и проката из высокоуглеродистых сплавов включают в себя следующие параметры:

– химический состав металла и его однородность внутри- и межплавочная, что обуславливает наследственно высокую однородность механических и технологических свойств готового металлопроката;

– высокая раскисленность стали, низкое содержание кислорода, связываемого химическими элементами-раскислителями, переводимыми в шлак (например белый шлак с низким содержанием FeO – менее

05%), и определяющая высокие свойства готовой продукции и состояние поверхности проката;

– максимально возможное снижение загрязненности стали от НВ, а также минимизация ликвационных явлений, в том числе и микрофизической – дендритной ликвации.

Все вышеуказанные характеристики обеспечиваются в комплексе и повышают потребительские свойства стали, НЛЗ и проката.

Цель исследования

Определить значимо влияющие факторы по технологическим переделам на формирование комплекса конечных свойств металлопроката. Разработать эффективную сквозную технологию в указанном направлении.

Методика исследования

В исследовании сквозного технологического процесса используются следующие виды анализа, испытаний и исследования. Для измерения температуры металла и химического состава стали, НЛЗ и проката применяли соответственно совмещенные пробоотборники для химического анализа жидкого металла и температуры расплава, его окисленности - система CELOX фирмы Heraeus Electro-Nite химические анализаторы по определению C, S, H – приборы C- S- H-MAT фирмы Stroulein или анализаторы AC и AS, спектрометр типа ARL 3600, Spectrolab M; для определения азота общего и свободного – LECO T 314 и LECO 436 соответственно, состав НВ – МРСА на РЭМ с энергодисперсионным микроанализатором. Механические свойства проката определяли на разрывных машинах, ударную вязкость – на маятниково-

вом копре, металлографические характеристики (макро- и микроструктура) – на оптическом и РЭМ.

Результаты исследования и их обсуждение

Основные требования к качественным показателям стали, НЛЗ и проката для изготовления высокоуглеродистой проволоки следующие: обеспечение заданного уровня и однородности основных химических элементов (С, Мn, Si) и металлических примесей (Cr, Ni и Cu); минимального содержания вредных примесей – P, S, As, Zn, Pb, Sn и т.п.; высокой чистоты стали по НВ, особенно недеформируемым алюминатам; высокого качества поверхности, минимальной ликвации, пористости. Кроме того, необходимо формировать эффективную микроструктуру в условиях прокатного и метизного переделов.

Химический состав стали

Внепечная обработка стали, проводимая на установке печь-ковш (УКП) и вакууматорах типа VD/VOD и RH, гарантирует точное попадание в заданный химический состав сталей марок 70-85 с низким внутриваночным разбегом массовых долей элементов на уровне $\Delta C = 0-0,01\%$; $\Delta Mn = 0-0,03\%$; $\Delta Si = 0-0,03\%$, межваночный разброс соответственно составляет $\Delta C = 0-0,04\%$; $\Delta Mn = 0-0,05\%$; $\Delta Si = 0-0,05\%$. Содержание фосфора, серы, азота и водорода обеспечивается на уровне соответственно не более 0,010, 0,005, 0,007% (в свободном состоянии) и 2,0 ppm. При производстве стали на базе селективно отобранного металлолома с добавлением передельного чугуна в жидком или твердом состоянии или другого сырья в твердом состоянии (Синтикама, Суперкома, горячебрикетированного железа – ГБЖ). Остаточное содержание металлических примесей достигает достаточно высоких значений.

Доказано [1, 2], что содержание $Cr \leq 0,15\%$, $Ni \leq 0,15\%$, $Cu \leq 0,25\%$ не оказывает негативного воздействия на свойства катанки, технологичность ее волочения и свивки канатных конструкций. В настоящее время при производстве стали в ДСП на твердой шихте можно обеспечить в стали электродугового производства массовые доли хрома, никеля и меди на уровне $\leq 0,05$, $\leq 0,10$ и $\leq 0,13\%$ соответственно.

Вакуумирование стали, обеспечивая ее глубокую дегазацию (до вакуумирования содержание в стали водорода – 2-6 ppm, после – 0,3-1,5 ppm, а азота – соответственно 0,010-0,012 и 0,005-0,007%), обуславливает дополнительное увеличение пластичности катанки, бунтового проката. Так, при первичных испытаниях катанка из невакуумированной стали марки 70 имеет относительное сужение Ψ – 30-35%, а из вакуумированной стали – 38-45%.

Количество вредных примесей в стали обеспечивается на уровне следов. Это исключает явления красно- и хладоломкости, повышает пластические характеристики катанки и ее способность к интенсивной деформации в холодном состоянии.

Неметаллические включения

Эндогенные и экзогенные НВ образуются в результате реакций, связанных с легированием, десульфурацией, дефосфорацией, раскислением стали, а также являются продуктами износа футеровочных огнеупоров.

НВ взаимодействуют с металлической матрицей и имеют различные деформационные свойства. Вследствие этого на границе недеформирующихся НВ формируются микрополости, по которым в дальнейшем может происходить разрушение катанки и проволоки. Оценить деформируемость НВ можно индексом деформируемости ν , который определяется отношением степеней деформации НВ и металлической матрицы. Чем ниже значения этого индекса, тем менее пластичны НВ и тем вероятнее разрушение металла в процессе деформации. Наоборот, чем выше уровень этого индекса, тем пластичнее НВ, и при значении, равном 1, деформируемость НВ и металла одинаковая. Опасные НВ в этом смысле ($\nu = 0$) – алюминаты и алюмокальциниты, наиболее пластичны сульфиды марганца ($\nu = 1$). Сульфиды марганца удовлетворительно деформируются и дробятся в процессе горячей прокатки катанки, образуя мелкие строчки пластичных НВ, хорошо деформируемых в дальнейшем при холодном волочении. Особенно вредное влияние оказывают алюминаты [1, 2].

Эффективно использование модифицирования стали кальцием при помощи ввода на УКП в несколько приемов кальцийсодержащей порошковой проволоки (SiCa, FeCa). При этом возможен перевод недеформируемых алюминатов состава $MgO \cdot Al_2O_3$, $CaO \cdot Al_2O_3$ при отношении $Ca/a_o = 0,60-1,20$ (a_o – активный кислород) в пластичное соединение – $12CaO \cdot 7Al_2O_3$ с пониженной температурой плавления, которое легко переводится в шлак. При другом отношении Ca/a_o образуются твердые тугоплавкие алюминаты, которые формируют настывы в стаканах-дозаторах и недеформируемые НВ в стали. Использование полностью магниальных сталеразливочных ковшей (СК), обработка стали белыми шлаками, редкоземельными металлами (РЗМ) также способствует снижению загрязненности стали НВ.

Макро- и микроструктура НЛЗ и их влияние на макро- и микроструктуру катанки

Для формирования качественной макроструктуры, минимизации ликвационных явлений в НЛЗ и катанке наиболее эффективны методы разлива стали с обеспечением максимального развития зоны равноосных кристаллов (ЗРК) при сокращении зоны столбчатых кристаллов (ЗСК).

Результаты исследований показывают следующее:

1. Из-за дендритной ликвации образуются ликвационные полосы, структурная полосчатость, остатки которых выявляются в катанке и проволоке. Ос-

новными ликвидирующими элементами являются С, Р, Mn, Cr, Si. Электромагнитное перемешивание (ЭМП) способствует реализации затравочно-инокулирующего эффекта при кристаллизации стали, который заключается в отрыве частиц от дендритов и перемещении их в сердцевину НЛЗ, что увеличивает количество центров и способствует увеличению скорости кристаллизации. Зона равноосных кристаллов (ЗРК) в результате действия ЭМП заметно увеличена – в среднем в 1,7 раза, при этом центральная ликвация и пористость рассредотачиваются.

2. Ликвация на микроуровне обуславливает формирование в центральных частях высокоуглеродистой катанки мартенситных участков, протяженность которых составляет от 5 до 200 мкм. Выбор наилучших режимов кристаллизации слитка, применение ЭМП, обеспечение степени перегрева над температурой ликвидус на минимально возможном уровне (не более 20–30°C) позволяет исключить появление закалочных структур. Этому может способствовать замедленное охлаждение разлитого слитка под колпаками, в обогреваемых или необогреваемых колодцах, высокотемпературный (~1200°C) длительный (не менее 6 ч) гомогенизирующий отжиг. Наиболее эффективные режимы кристаллизации НЛЗ сечением 125×125 мм: скорость разливки 2,5–3 м/мин; перегрев над температурой ликвидус ~20–30°C.

Несмотря на вредность закалочных структур, многие производители допускают их наличие в центральных участках сечения катанки участков мартенсита протяженностью до 20 мкм. Сравнение вредности мартенситных участков и структурно-свободного цементита (ССЦ) в высокоуглеродистой стали показывает, что умеренная протяженность мартенсита в меньшей степени влияет на обрывность катанки и проволоки при волочении, чем наличие в сечении грубой сплошной ССЦ. Это обусловлено тем, что при

деформировании высокоуглеродистой стали дислокации, как источник деформации, легко переползают через мартенситные участки, но никак не могут преодолеть ССЦ.

Потребители высокоуглеродистой катанки ограничивают наличие в микроструктуре катанки ССЦ и грубой цементитной сетки. Для оценивания этой структурной составляющей имеются специальные эталонные шкалы, которые классифицируют степень развития цементита в микроструктуре и определяют приемочные требования (например, по спецификации фирмы Michelin не более класса «В»).

Заключение и выводы

В статье рассмотрено влияние металлургических факторов (химический состав стали, НВ, ликвация химического состава в макро- и микрообъемах литого металла и т.п.) на комплекс качества высокоуглеродистой стали. Установлены следующие научнообоснованные закономерности по улучшению качественных параметров высокоуглеродистой катанки. В итоге обеспечивается требуемый НД и потребителями комплекс наилучших структур и свойств высокоуглеродистой стали, что обуславливает в последующем высокую технологичность при ее переработке на метизном переделе.

Список источников

1. Особенности технологии производства высокоуглеродистой катанки / А.Б. Сычков, В.В. Парусов, Ю.А. Ивин, А.Ю. Дзюба, Г.С. Зайцев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1. С. 38-42.
2. Парусов В.В., Сычков А.Б., Парусов Э.В. Теоретические и технологические основы производства высокоэффективных видов катанки. Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2012. 376 с.

Сведения об авторах

Сычков Александр Борисович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры литейных процессов и материаловедения, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. Email: absyckov@mail.ru. ORCID 0000-0002-0886-1601.

Бигеев Вахит Абдрашитович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры металлургии и химических технологий института металлургии, машиностроения и материалобработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: y.bigeev11@ya.ru

Исаев Михаил Константинович – аспирант кафедры металлургии и химических технологий института металлургии, машиностроения и материалобработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия

Зайцев Григорий Сергеевич – аспирант кафедры металлургии и химических технологий института металлургии, машиностроения и материалобработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

INFLUENCE OF QUALITY INDICATORS OF STEEL AND CONTINUOUS CASTING ON THE QUALITY OF ROLLED HIGH CARBON STEEL

Sychkov Aleksandr B. – DrSc (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Foundry Processes and Materials Science, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: absychkov@mail.ru. ORCID 0000-0002-0886-1601. Researcher ID: E-4516-2016

Bigeev Vakhit A. – Dr. Sci. (Eng.), Professor of Metallurgy and Chemical Technologies Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: v.bigeev11@yandex.ru

Isaev Mikhail K. – Postgraduate, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, Russia

Zaitsev Gregory S. – Postgraduate, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, Russia

Abstract. The article discusses the features of end-to-end technology for the production of high-carbon steel, its out-of-furnace processing, continuous casting, rolling of coils and wire rods, which form the quality indicators of the metal that is effectively processed at the hardware processing stage. In the process of research, the influence of technological factors on the complex of quality indicators of steel, continuous cast steel, and then hereditary and coiled steel was studied. At the same time, technological methods are given that ensure a narrow range of values of alloying elements in steel, as well as a low level of harmful impurities in high-carbon steel. Measures have been developed to reduce metal contamination by non-metallic inclusions (NMI). It has been shown that a set of technical and technological measures influences the reduction of steel contamination with NMI, such as modifying steel in steel pouring ladle (SPL) with calcium-containing flux-cored wire (CW) or rare-earth alloy (this is a rather expensive method), introducing “white” slag for desulfurization and deep deoxidation of steel, processing steel by vacuum (vacuum-carbon deoxidation), protection of the metal stream during continuous casting from secondary oxidation, the use of basic refractories for the lining of the SPL and tundish (T), the choice of material for casting dosing nozzles, etc. Segregation processes in continuous steel mills have an important influence on the properties of coiled products. This primarily relates to microphysical dendritic segregation, which in rolled products is revealed in the form of structural longitudinal banding with the presence of microareas with a deviation of the chemical composition from the ladle analysis and the appearance in some cases of hardening structures. Taken together, this ensured high technology for processing wire rod and coiled steel into wire products.

Keywords: high-carbon steel, end-to-end technology, chemical composition, non-metallic inclusions, structure, processing manufacturability.

Ссылка на статью:

Влияние качественных показателей стали и НЛЗ на качество проката из высокоуглеродистой стали / Сычков А.Б., Бигеев В.А., Исаев М.К., Зайцев Г.С. // Теория и технология металлургического производства. 2024. №2(49). С. 12-15.
Sychkov A.B., Bigeev V.A., Isaev M.K., Zaitsev G.S. Influence of quality indicators of steel and continuous casting on the quality of rolled high carbon steel. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2024, vol. 49, no. 2, pp. 12–15.